259—266

动 物 学 研 究 1997. 18 (3): 259—266 CN 53-1040/Q ISSN 0254-5853
Zoological Research

家兔腓肠肌肌构筑及肌纤维型的实验研究

S829.1
Q959.836

朱道立
(江苏省南通师范专科学校生物系 南通 226007)

A

摘要 根据家兔(*Oryctolagus cuniculus domestica*)腓肠肌的肌构筑和神经供应特征，将该肌外侧头分为内侧、中间、外侧3个亚体，内侧头无肌亚体。用家兔8例16侧腓肠肌，按上述3个亚体及内侧头分别取材，做冰冻横切片，肌动球朊ATP酶染色，将肌纤维分为SO型、FOG型和FG型。检测各亚体的肌纤维型构成比率，并以图象分析仪测量3型肌纤维的直径和横切面积。结果发现：SO型纤维在内侧头占16.7%，在外侧头由内侧亚体的11.3%向外侧亚体的20.8%依次递增；FOG型纤维由内侧亚体的23.2%向外侧亚体的30.9%递增。FG型纤维则从内侧亚体的65.5%向外侧亚体的48.3%逐渐递减。3型肌纤维成点缀式镶嵌型分布。各亚体中SO型纤维最细(57.4—58.2 μm)，FOG型纤维稍粗(60.1—61.1 μm)，FG型纤维最粗(63.6—64.5 μm)。

关键词 家兔，腓肠肌，肌动球朊，ATP酶，肌亚体，肌纤维型

哺乳动物骨骼肌的肌纤维根据形态构造、组织化学和生理特性的不同，分为SO型(慢缩氧化纤维)、FOG型(快速氧化糖酵解纤维)、FG型(快缩糖酵解纤维)(Brooke等，1970；Peter等，1972)，各适应不同的功能需要。已有的研究表明，个体内不同肌的肌纤维型构成比例及粗细有显著差异(Pullen，1977；Goryea，1981)，同一块肌不同部分的肌纤维型构成与大小也互不相同(English，1982；Henriksson-Larsen，1985)。这证实不同的肌肉之间，甚至同一块肌肉的不同部位之间，其功能也各不相同。关于家兔腓肠肌的肌纤维型研究，国内未见报道，国外资料也大多取材于肌肉的中部，不能反映整块腓肠肌的肌纤维型分布状况。本实验根据骨骼肌亚体化原则，确定腓肠肌肌亚体划分的标志和依据，并研究腓肠肌各肌亚体的肌纤维型构成和肌纤维横切面积，探讨肌构筑及肌纤维型与肌功能相互适应的关系。

1 材料和方法

1.1 成年家兔(*Oryctolagus cuniculus domestica*)8例16侧，不拘雌雄，以大体解剖法(English，1982；Zenker，1988)观察每侧腓肌的起止占点、肌束排列、神经干分支形式及各分支供应范围的特征，以便确定其肌亚体划分的标志和依据。

1.2 另取家兔5只，用改良的AchE染色法(Ypey，1978)研究肌运动终板分布。10侧腓肠肌做整肌染色，处理后的肌纤维染成棕褐色，肌腱和腱膜成白色，运动终板呈棕色至

本文1995年10月18日收到，1996年7月23日修回

黑色，各结构清晰可辨。

1.3　将家兔8例16侧，在20%氨基甲酸乙酯麻醉状态下，每侧腓肠肌均按腓肠肌内侧头和腓肠肌外侧头的内侧亚体、中间亚体、外侧亚体，分别取肌组织4块，立即置入液氮（-196℃）内，20 min后取出做恒冷箱冰冻切片（-20℃），切片厚10 μm，室温下晾干后，用肌动球朊ATP酶法染色（pH4.3）（朱道立，1994），并以碱预孵ATP酶法（pH10.4）作为对照，明确分出深染的SO型、浅染的FOG型及中等染色的FG型3型肌纤维。

1.4　肌动球朊ATP酶染色（pH4.3）的切片上，定点取样20个视野分别计数SO型、FOG型、FG型肌纤维数，统计各亚体肌纤维型构成比例。选取家兔5例10侧腓肠肌，在肌动球朊ATP酶染色（pH4.3）的切片上，选取与切片方向垂直成圆形的肌纤维横切面，排除成椭圆形的肌纤维斜切面。用Opton半自动图象分析仪（IBAS 1000），采用专用软件包分别测量3型肌纤维的横切面积和直径：先测量肌纤维横切面的长径（a）和通过长径中点的垂直宽径（b），然后计算出肌纤维的平均直径[（$a+b$）/ 2]，由此推算出肌纤维的平均面积[（直径/2）^{2}·π]。每张切片定点取3个视野，共测量150根肌纤维（SO型50根、FOG型50根、FG型50根），每块肌4张切片，共测量600根肌纤维。

2　结果

2.1　腓肠肌的肌亚体划分

根据腓肠肌的起止点、肌束排列、肌运动终板分布及神经分支的特征，腓肠肌外侧头可明确分为内侧亚体、中间亚体和外侧亚体等3个肌亚体。内侧亚体居外侧头最内侧上部，在肌背部为腘窝外下界的锥形隆起；肌束自内侧腱板斜向下止于腓肠肌内侧头表面的腱膜，呈半羽状排列；肌亚体上端以扁腱越过中间亚体起点后起始于股骨外侧髁和骨腘面。中间肌亚体位于内、外侧亚体之间，其两侧借内、外侧腱板分别与内、外侧亚体分隔；肌束自内侧腱板止于外侧腱板，呈半羽状排列；肌亚体上端以短腱起始于股骨外侧髁，下端与腓肠肌内侧头腱膜相续。外侧肌亚体占腓肠肌外侧头的最外侧，该肌亚体腹、背面均有腱膜覆盖。肌束呈背腹走向，也是半羽肌。肌亚体上端以薄腱膜起自股骨外侧髁和胫骨近侧端，下端连于跟腱（图1）。腓肠肌内侧头较外侧头窄长，起自股骨内侧髁，止于跟腱，也是半羽状肌，无区分肌亚体的形态特征。

在腓肠肌AchE染色标本，肉眼清晰可见分布于肌表面的黑色运动终板，运动终板呈条带状位于肌纤维中部。腓肠肌外侧头3个肌亚体各有1条独立的运动终板带，腓肠肌内侧头也有1条独立的运动终板带。终板带均成板状分布。腓肠肌内侧头与外侧头外侧亚体的运动终板带呈左右水平走向，板状分布，外侧头中间亚体、内侧亚体的运动终板带均呈背腹走向（图2）。

支配腓肠肌的胫神经，在腘窝下界显露出粗大的腓肠肌-比目鱼肌神经干，并与腘动脉发出的腓肠动脉伴行。神经干向外侧分出内侧亚体支、中间亚体支和外侧亚体支，分别支配腓肠肌外侧头的3个肌亚体，还单独发出腓肠肌内侧头支去支配腓肠肌内侧头（图1）

2.2　三种肌纤维型的构成比例

腓肠肌内侧头与外侧头内外侧亚体之间的3型肌纤维构成比例有极显著差异，内侧头

与外侧头中间亚体差异不显著；除内侧头 SO 型、FG 型和中间亚体 SO 型及外侧亚体 FG 型肌纤维左、右侧之间存在显著差异外，左、右侧之间均无显著差异（表 1）。

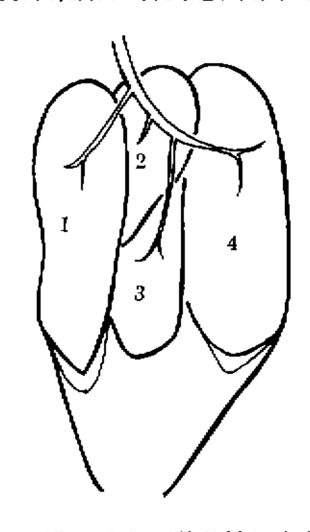


图 1　家兔腓肠肌各肌亚体的神经分支分布图

Fig. 1　Sketch of the nerve distribution in each subvolume of rabbits' gastrocnemius

1 内侧头（the medial gastrocnemius）；2. 外侧头内侧亚体（the medial subvolume of the lateral gastrocnemius）；3. 外侧头中间亚体（the intermediate subvolume of the lateral gastrocnemius）；4. 外侧头外侧亚体（the lateral subvolume of the lateral gastrocnemius）。

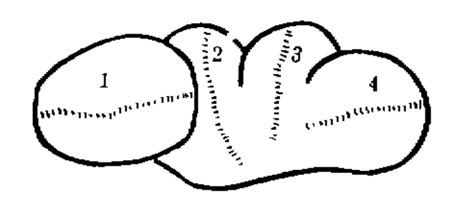


图 2　家兔腓肠肌各肌亚体横切面示运动终板带

Fig. 2　The distribution of motor end-plates in the cross-section in each subvolume of rabbits' gastrocnemius

1，2，3，4同图1；1，2，3，4 are the same as Fig 1）。

2.3　3 种肌纤维型的平均直径和横切面积

腓肠肌内、外侧头各亚体 3 种肌纤维型的直径和横切面积见表 2。各肌亚体的 FG 型纤维最粗，FOG 型纤维其次，SO 型纤维最细。经统计分析表明，SO 型纤维内侧头与内侧亚体、FG 型纤维内侧头与外侧亚体、外侧头的内侧亚体与中间亚体均有显著差异。FOG 型纤维外侧头的内侧亚体与中间亚体、FG 型纤维内侧亚体与外侧亚体有极显著差异。其余各亚体比较，均无显著差异。此外，肌纤维直径和横切面积的左右侧比较，差异亦不显著。

2.4　肌纤维的同型聚集

在所有切片中，3 型肌纤维的分布基本上呈点缀式镶嵌型分布，但常见到同型肌纤维的聚集现象。根据 Jennekens 等（1971）介绍的同型包裹纤维的概念，即指完全聚集在一起的同型纤维数目达 15 条以上，就出现同型包课纤维，并称该群肌纤维为同型聚集。由观察发现，腓肠肌内侧头，外侧头的内侧亚体、中间亚体、外侧亚体均可见到快缩纤维的同型聚集，但各部出现的多少和大小不同。内侧亚体 FG、FOG 型肌纤维的同型聚集出现最多最大，还见有肌纤维数达 50—100 条的同型聚集（图 3—6），其聚集的同型肌纤维大小正常，未见附近区域的 SO 型肌纤维萎缩或大小不均的现象。

表1 家兔腓肠肌(8例16侧)内、外侧头各肌亚体三型肌纤维左右侧构成比率(%)

Tab. 1 Three fiber type proportions both sides (%) in each subvolume of the medial and lateral gastrocnemius of the rabbits (16 sides of 8 cases)

肌亚体	内侧头			外侧头内侧亚体		
肌纤维型	SO	FOG	FG	SO	FOG	FG
左侧$\bar{x}\pm SD$	15.8±1.7*	26.6±1.8	57.6±2.0*	11.0±1.1	23.6±0.7	65.4±0.9
右侧$\bar{x}\pm SD$	17.6±0.5	26.9±1.0	55.5±0.9	11.6±2.0	22.9±1.9	65.5±1.1
$\bar{x}\pm SD$	16.7±1.57	26.7±1.45	56.6±1.85	11.3±1.58**	23.2±1.40**	65.5±1.00**
肌亚体	外侧头中间亚体			外侧头外侧亚体		
肌纤维型	SO	FOG	FG	SO	FOG	FG
左侧$\bar{x}\pm SD$	16.5±1.2*	25.8±1.9	57.7±1.1	20.5±1.6	30.5±2.7	49.0±1.5*
右侧$\bar{x}\pm SD$	15.1±1.0	27.7±1.7	57.2±1.5	21.0±1.6	31.3±1.1	47.7±0.8
$\bar{x}\pm SD$	15.8±6.22	26.8±1.95	57.4±1.30	20.8±1.53**	30.9±1.35**	48.3±1.38**

* 为与同项对侧比较有显著差异(shows significant difference)($P<0.05$);
* * 为分别与内侧头比较有极显著差异(shows the most significant difference)($P<0.02—0.001$)。
其它无显著差异(the others show no significant difference)($P>0.05$)。

表2 家兔腓肠肌(8例16侧)各肌亚体3型肌纤维的直径(μm)与横切面积(μm^2)

Tab. 2 The mean cross-sectional areas and the mean diameters of three fiber types in each subvolume of gastrocnemius of rabbits (16 sides of 8 cases)

肌纤维型	直径和面积	内侧头	外侧头			
			内侧亚体	中间亚体	外侧亚体	
SO型	直径±SD	*58.2±1.6	*57.4±1.6	58.1±1.7	57.9±1.5	57.9±1.6
	面积±SD	2 662±141	2 592±149	2 654±158	2 636±133	2 636±145
FOG型	直径±SD	*60.3±1.9	60.1±1.9**	*61.1±1.9**	60.4±1.7	60.475±1.9
	面积±SD	2 861±178	2 843±175	2 929±175	2 873±160	2 877±172
FG型	直径±SD	*64.2±1.5	*64.5±1.5**	*63.9±1.3	*63.6±1.5**	64.05±1.5
	面积±SD	3 240±152	3 270±150	3 213±131	3 178±144	3 225±144

注:各亚体间3型肌纤维的比较,*$P<0.05$,有显著差异;**$P<0.001$有极显著差异,其它$P>0.05$,无显著差异(three fiber types in each subvolume of gastrocnemius have been compared * showed: significant difference ($P<0.05$); ** showed the most significant difference ($P<0.001$); others showed no significant difference in the others ($P>0.05$)。

3 讨论

骨骼肌的肌亚体是解剖学构造和运动生理学的独立结构单位。运动单位的分布限于肌亚体的范围之内。肌亚体的划分类似于肝、脾、肺、肾等内脏器官的分段,有独立的神经支配和血管营养。提示我们可以像内脏器官的分段切除一样,也能在整肌内实施肌亚体连带神经血管蒂移植,以便使移植部位的力量与速度恢复达到预期的效果。

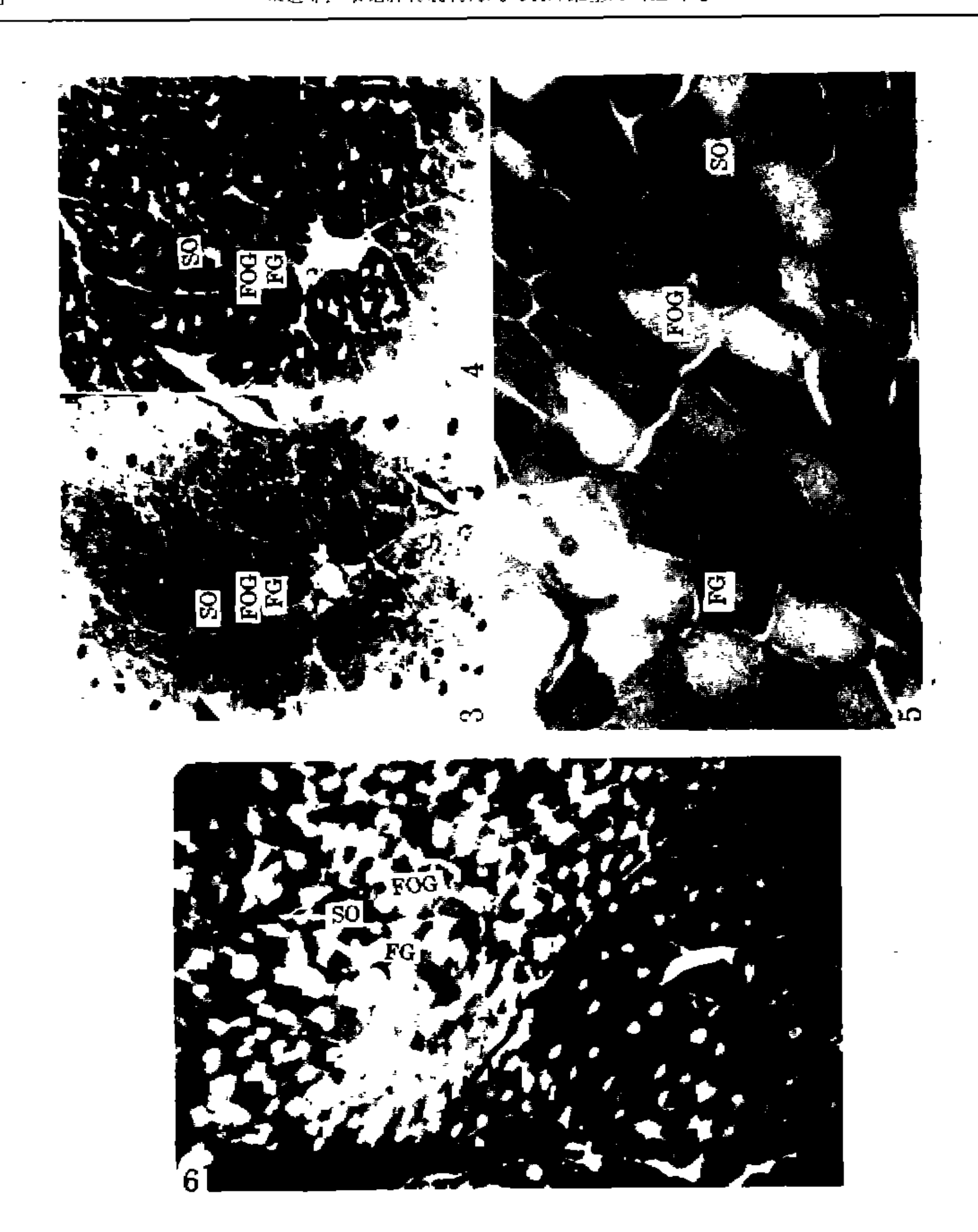


图 3—6　家兔腓肠肌外侧头各亚体肌动球朊 ATP 酶染色结果

Figs. 3-6　Stain each subvolume of the lateral gastrocnemius of rabbits' gastrocnemius with actomyosin ATP ase

3. 内侧亚体（the medial subvolume）（×40, pH 4.3）、慢缩纤维（SO 型）深染，快缩纤维（FOG 型、FG 型）浅染，快缩纤维的同型聚集[slow-twitch fiber（type SO）was dark and fast-twitch fiber（type FOG, type FG）pale. An arrow was showing the type grouping of fast-twitch fibers]; 4. 内侧亚体（the medial subvolume）（×40, pH10.4）、慢性纤维（SO 型）浅染，快缩纤维（FOG 型、FG 型）深染[slow-twitch fiber（type SO）was pale and fast-twitch fiber（type FOG, type FG）was dark]; 5. 中间亚体（the intermediate subvolume）（×200, pH4.3）、慢缩氧化纤维（SO 型）深染，快缩氧化糖酵解纤维（FOG 型）浅染，快缩糖酵解纤维（FG 型）中染[slow=twitch oxidative fiber（type SO）was dark, fast-twitch oxidativeglycolytic fiber（type FOG）

pale, and Fast-twitch glycolytic fiber (type FG) intermediate] 6 外侧亚体 (the lateral subvolume) (×40, pH4.3), 慢缩氧化纤维 (SO 型) 深染, 快缩氧化糖酵解纤维 (FOG 型) 浅染, 快缩糖酵解纤维 (FG 型) 中染, 3 型肌纤维呈现点缀式镶嵌型分布[slow-twitch oxidative fiber (type SO) was dark, fast-twitch oxidativeglycolytic fiber (type FOG) was pale, fast-twitch glycolytic fiber (type FG) was intermediate. Three fiber types in a muscle embellished and arranged in mosaic pattern].

English 等 (1982) 采用糖原耗竭、神经去除、解剖划分等方法进行肌亚体研究。我们在这 3 种研究方法基础上，进一步采用肌运动终板带分布以验证骨骼肌亚体。正如 Galvas (1980) 在研究猫趾长屈肌时指出的，运动终板与骨骼肌的神经支配相似，每个肌亚体均有其各自独立的运动终板带分布。家兔腓肠肌是羽状肌，该肌的肌纤维数量较同等体积的梭形肌要多，产生的张力也较大；生理横断面积是胫骨前肌群的 2—6 倍之多，但肌束长度低于前肌群。据此推测腓肠肌在功能上属力量型肌。腓肠肌内侧头主要产生张力，而构成腓肠肌外侧头的 3 个肌亚体均为半羽状肌，使总体成为多羽肌。外侧头生理横切面积、肌束长、肌节数和肌羽状角都明显大于内侧头；加上外侧头 3 个肌亚体起点和拉力方向各异，肌纤维长度较短、缩短距离较小，生理横断面积较大等特点，能产生比内侧头更大的力量和速度。

家兔骨骼肌由 3 型组织化学特性和收缩特性不同的肌纤维组成。SO 型纤维收缩速度慢，兴奋阈低，易发动而不易疲劳，对牵张反射敏感的大量肌梭分布于 SO 型纤维内。肌梭的一级感觉末梢分布于核袋 1 纤维与动力性反应有关；二级感觉末梢则分布于核袋 2 纤维和核链纤维，与静力性反应密切相关。SO 型肌纤维具调节平衡与姿势的作用，适于紧张性的活动。FOG 型肌纤维既能进行有氧代谢，又能通过糖原酵解提供能量，快缩而不易疲劳，产生张力较低，适于持久性快速运动。FG 型肌纤维缺少氧化酶，容易疲劳，适于爆发性的短时高张力快速运动。

本研究发现腓肠肌内、外侧头的各亚体 3 型肌纤维呈点缀式镶嵌型分布。各肌亚体内肌纤维型构成比是相对匀称的，但各亚体之间比较有显著的区别。English (1982) 研究猫的腓肠肌外侧头发现，居于内侧最近端的肌亚体快缩纤维比例最高，与我们发现家兔腓肠肌内侧亚体快缩纤维高达 88.7%，其中 FG 型纤维达 65.5%的结果有相似之处。当家兔需少量肌力时，只腓肠肌外侧头外侧亚体的活动。只有当肌力需要超过 20%时，才有内侧亚体和中间亚体的参与。这与腓肠肌作用于膝和踝两个关节并维持四足动物的姿势与平衡的功能相一致。当需要力量和速度时，腓肠肌进一步提供家兔在行走、奔跑、跳跃等运动中的推进动力。

肌纤维的直径和面积在同一个体的不同肌肉之间，以及同一块肌肉的不同部位之间有所差异，反映出肌肉之间和肌肉内部各亚体之间的功能需要是有所不同的。在腓肠肌外侧头的内侧亚体最为显著，该亚体以 FG 型纤维为主 (65.5%) 的同时，肌纤维直径最粗大，SO 型纤维比例很少 (11.3%)，提示内侧亚体主要进行快速运动，这可能是造成内侧亚体 FG 型纤维变粗壮的原因。

肌纤维的同型聚集常被认为是一种神经损伤的标志，表明周围神经萌芽的神经再支配。在人类被作为活检诊断某些神经肌病的指标之一。Jennekens (1971) 等认为，以某种肌纤维型占优势的肌肉，该型肌纤维的同型聚集也就多见，而且群体变化大小不等。我们的实验结果证实，在快缩纤维比例较高的腓肠肌内侧亚体，其快缩纤维同型聚集出现最

多和最大，而快缩纤维比例较低的外侧亚体未见到同型聚集。这与 Jennekens（1971）的结果相一致。在内侧亚体的切片上，见到快缩纤维同型聚集达 50—100 条肌纤维呈现跨肌束分布，肌纤维形态结构正常，未见邻近快缩纤维萎缩或大小不均匀的现象。作者推测该现象可能是支配该肌束的神经多数为快运动神经元的缘故或是由于肌纤维功能发育分化的结果，有待进一步探索与研究。

参 考 文 献

朱道立，张艳红，1994 家兔胫骨前肌肌球蛋白 ATP 酶的酸碱法组化研究 中国兽医杂志，**20**（9）：7—9

Brooke M H, Kaiser K K, 1970. Three"myosin adenosine triphosphatase"systems The nature of their pH lability and sulfhydral dependence *J Histochem Cytochem*, **18** (9): 670–672

English A W, Letbetter W D. 1982 A histochemical analysis of identified compartments of cat lateral gastrocnemius muscle *Anat Rec*, **204**: 103

English A W, Letbetter W D. 1982 Anatomy and innervation patterns of cat lateral gastrocnemius and plantaris muscles *Am J Anat*, **164**: 67 77

Galvas P E, Gonyea W J. 1980 Motor–end–plate and nerve distribution in a histochemically Compartmentalized pennate muscle in the cat *Am J Anat*, **159**: 147

Gonyea W J, Ericson G C, 1981 Morphological organization and contratile properties of the wrist flexor muscles in the cat *Anat Rec*, **199**: 321 339

Henriksson Larsson K. 1985 Distribution, number and size of different types of fiber in whole cross–sections of female *M tibialis* anterior *Acta Physiol Scand*, **123**: 229–235

Jennekens F G I, Tomlinson B E, Wilson J N, 1971 Data on the distribution of fiber types in five human muscles *An Autopsy Study*, **14**: 245

Peter J B, Barnard R J, Edgerton V R *et al*, 1972 Metabolic profile of three fiber types of skeletal muscle in guineapig and rabbits *Biochemistry*, **11**: 2637–2634

Pullen A H, 1977. The distribution and relative sizes of fiber types in the extensor digitorum longus and soleus muscles of the adult rat *J Anat*, **123** (2): 467 486

Ypey D L, 1978 A topographical study of the distribution of motor end–plates in the cutaneus pectoris, sartorius, and gastrocnemius muscles of the frog *J Morphol*, **155**: 327

Zenker W, Sandoz PA, Neuhuber W, 1988. The distribution of anterogradely labeled I–IV primary afferents in histochemically compartments of the rat's sternomastoid muscle. *Anat. Embryol.*, **177**: 235–243.

A STUDY ON THE ARCHITECTURE AND FIBER TYPES OF THE GASTROCNEMIUS MUSCLE IN RABBIT

Zhu Daoli

(Department of Biology, Nantong Teachers' College, Jiangsu Province, Nantong 226007)

Abstract

The gastrocnemius muscles of rabbits on both sides were studied. Frozen transverse sections were stained with actomysin ATPase Muscle fibers were identified as type SO, type FOG and type FG. The proportion of fiber types in each subvolume was calculated with microscopic photographs and the mean cross–sectional areas of three fiber types

were measured with a image analysing system. The following were found: (1) the proportion of SO fiber type in the medial gastrocnemius was 16.7%; (2) the proportion of SO fiber type increased progressively from 11.3% of the medial subvolume of the lateral gastrocnemius to 20.8% of the lateral subvolume; (3) the proportion of FOG fiber type increased progressively from 23.2% of medial subvolume to 30.9% of lateral subvolume; (4) the proportion of type FG fiber decreased successively from 65.5% of medial subvolume to 48.3% of lateral subvolume; (5) the three fiber types were in a mosaic pattern; (6) the diameter of type SO fiber in each subvolume was the smallest (57.4-58.2 μm), the diameter of type FOG fiber larger (60.1-61.1 μm), and the diameter of type FG fiber the largest (63.6-64.5 μm).

Key words Rabbit, Gastrocnemius, Actomyosin, ATP ase, Muscle subvolume, Muscle fiber type